# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

# MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 669.187.66.045 DOI 10.12737/19700

## Исследование эффективности электроплавки окатышей в дуговой печи при дожигании оксида углерода топливно-кислородными горелками**

**В. А. Степанов[1], Л. Н. Крахт[2], Э. Э. Меркер[3], А. Ю. Кем[4], Д. А. Харламов[5]****
[1,2,3,5] Старооскольский технологический институт, г. Старый Оскол, Российская Федерация
[4] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

## Research of pellet electrosmelting efficiency in arc furnace under the carbon oxide post-combustion by fuel oxygen burners***

**V.A. Stepanov[1], L.N. Krakht[2], E.E. Merker[3], A.Y. Kem[4], D.A. Kharlamov[5]****
[1,2,3,5] Stary Oskol Technological Institute, Stary Oskol, Russian Federation
[4] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Рассмотрены особенности нагрева и плавления железорудных металлизованных окатышей (ЖМО) с применением способа подачи окатышей через осевые каналы электродов. При использовании данной системы подачи железорудного сырья через отверстия в электродах сыпучие окатыши попадают в зону влияния электрических дуг на расплав, что обеспечивает высокую скорость их плавления. При этом улучшаются технико-экономические показатели электроплавки в дуговой сталеплавильной печи (ДСП). Применение топливно-кислородных горелок с подачей кислорода позволяет оптимизировать процесс плавления железорудных металлизованных окатышей, улучшая условия шлакообразования, нагрева, обезуглероживания металла с дожиганием отходящих горючих газов ($CO$, $H_2$, и др.) в дуговой печи.

Some features of heating and melting iron-rich pellets (IRP) by the method of charging the pellets through the axial ducts of electrodes are considered. When using this system of supplying iron ore raw materials through the holes in the electrodes, loose pellets fall into the impact zone of the electric arcs on the melt that ensures a high speed of their fusion. At the same time the technical-and-economic indices of the electrosmelting in the electric arc furnace (EAF) are improved. The use of the fuel-oxygen burners allow optimizing the IRP melting process improving the slagging conditions, heating, metal decarburization with post-combustion of final burning gases ($CO$, $H_2$, etc.) in the arc furnace.

**Ключевые слова**: металлизованные окатыши, электроплавка, электрод, дуговая печь, дожигание газов, электрическая дуга, горелка.

**Keywords**: metallized pellets, electrofusion, electrode, arc furnace, gas post-combustion, electric arc burner.

**Введение.** Производство стали в дуговых сталеплавильных печах — современная технология плавки высокого уровня [1–2]. Эффективность технологии электроплавки железорудных металлизованных окатышей (ЖМО) в дуговой сталеплавильной печи (ДСП) зависит от теплового состояния ванны жидкого металла, метода загрузки и скорости плавления ЖМО в ней, окисленности шлака и металла, степени обезуглероживания расплава [3–5]. Известно применение в реальных производственных условиях плавки ЖМО в ДСП топливно-кислородных горелок (ТКГ) для подачи кислорода, газа и угольной пыли с целью интенсификации процессов шлакообразования, нагрева и обезуглероживания в рабочем пространстве печи [6–8].

** Работа выполнена по тематике государственного задания № 11.63.2014/К (НИТУ МИСиС).
** E-mail: Viktor1990_31@mail.ru; lkrakht@mail.ru; merker@inbox.ru; akem@donstu.ru
*** The research is done within the frame of government task no. 11.63.2014/К (NITU MISiS).

**Цель настоящей работы** — исследование особенностей дожигании оксида углерода в ДСП топливно-кислородными горелками и установление их влияния на эффективность электроплавки ЖМО.

**Результаты и их обсуждение**. Исследования, выполненные в лабораторных и производственных условиях, показали, что подача ЖМО в расплав ванны дуговой печи, в зону воздействия электрических дуг, интенсифицирует технологические процессы электроплавки стали за счет повышения скорости нагрева и плавления окатышей в расплаве [9–10]. При этом установлено, что быстрый и экономичный нагрев ЖМО в значительной мере определяется скоростью загрузки окатышей в ванну жидкого металла.

Выбор скорости загрузки ЖМО ($V_{ок}$, кг/с) осуществляется с учётом текущего теплового состояния ванны, которое зависит от тепловой мощности печи и скорости плавления порций окатышей ($V_{пл}$, кг/с) в агрегате. При этом общая продолжительность нагрева и плавления окатышей ($\tau_{\Sigma}^{ок}$, с) зависит от общей тепловоспринимающей поверхности слоя ЖМО ($F_{ок}$, м$^2$) и его массы ($\Sigma\, m_{ок}$, кг).

В работе использовалось следующее обобщающее выражение для расчетов:

$$\tau_{\Sigma}^{ок} = (F_{ок} \cdot n \cdot \rho_{ок} \cdot r_{ок}) / (3V_{ок}), \quad (1)$$

где $F_{ок} = 4\pi \cdot r_{ок}^2$; $r_{ок}$ — радиус окатыша; $\Sigma\, m_{ок} = n \cdot m_{ок}$; $n$ — количество окатышей; $m_{ок} = (4/3)\pi \cdot r_{ок}^3 \cdot \rho_{ок}$; $\rho_{ок}$ — плотность материала окатыша, кг/м$^3$.

Учитывая, что поверхность порций ЖМО за некоторое время достигает температуры плавления ($T_{пл(пов)}$, $^{o}$С), а внутри каждого окатыша сохраняется пониженная температура ($T_{ок(в)}$, $^{o}$С), то суммарное время нагрева и плавления окатыша $\tau_{\Sigma}^{ок}$ будет равно

$$\tau_{\Sigma}^{ок} = \frac{\rho_{ок} \cdot [\overline{C_{ок}}(T_{пл(пов)} - T_{ок(в)}) + \Delta H_{пл}] \cdot r_{ок}}{q_{ок}^{ср}}, \quad (2)$$

где $\Delta H_{пл}$ — удельная теплота плавления окатыша, Дж/кг; $\overline{C_{ок}}$ — удельная теплоёмкость окатыша, Дж/ (кг К); $q_{ок}^{ср}$ — усреднённый тепловой поток на поверхность слоя ЖМО при нагреве его от $T_{ок(в)}$ до $T_{пл(пов)}$, который равен

$$q_{ок}^{ср} = \int_{T_{ок(в)}}^{T_{пл(пов)}} \alpha_{эф} \cdot (T_p - T_{ок(в)}) d\tau, \quad (3)$$

где $\alpha_{эф}$ — эффективный коэффициент теплоотдачи, Вт / (м$^2$ К); $T_p$ — температура расплава в печи, $K$.

Анализ приведённых выражений показывает, что при постоянстве физических свойств ($\rho_{ок}$, $\overline{C_{ок}}$, $\Delta H_{пл}$) и массы окатышей ($m_{ок}$), суммарное время $\tau_{\Sigma}^{ок}$ и скорость их загрузки ($V_{ок}$) в ДСП зависит от факторов теплового состояния ванны ($T_p$, $^{o}$С) и эффективности теплообмена ($\alpha_{эф}$) в системе «окатыш — расплав». На рис. 1 представлены результаты расчётов значений $\tau_{\Sigma}^{ок}$ в зависимости от $T_p$ и $\alpha_{эф}$ для разных данных по $r_{ок}$ при условиях подачи ЖМО в зону высоких температур под электроды в печи и вне этих электродов.

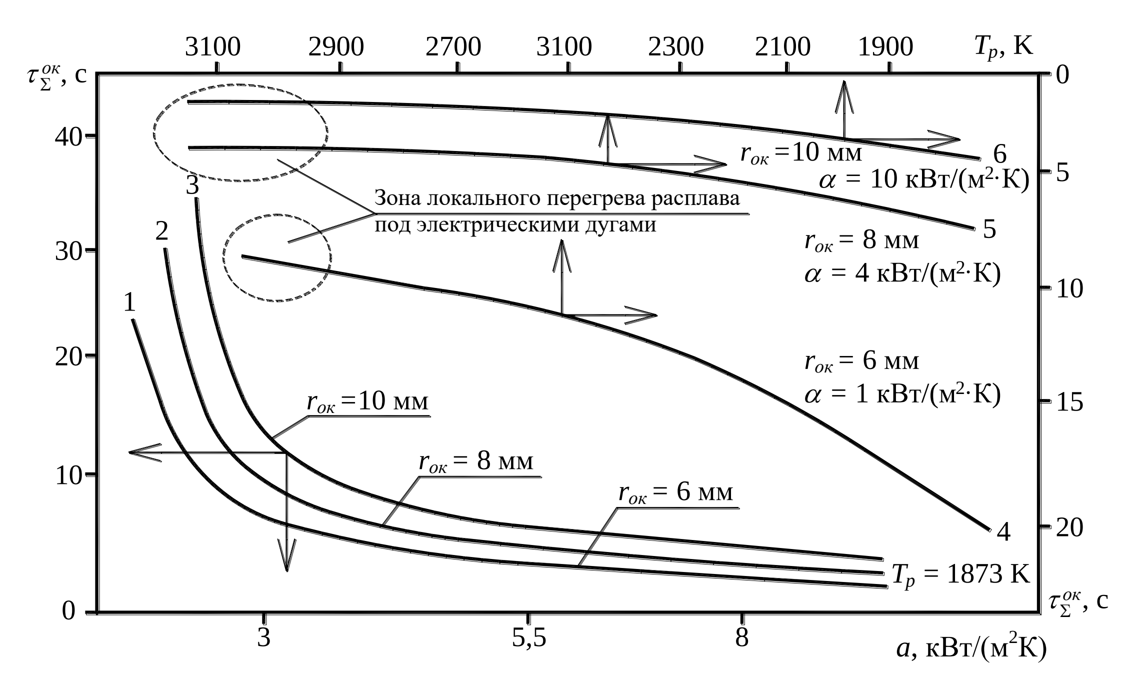



Рис. 1. Зависимость суммарной продолжительности плавления единичного окатыша $\tau_{\Sigma}^{ок}$ от эффективного коэффициента теплоотдачи $\alpha_{эф}$ (кривые 1–3) и температуры расплава $T$ (кривые 4–6): 1, 2, 3 — $\tau_{\Sigma}^{ок}$ ЖМО радиусом 6, 8, 10 мм при $T_p$=1873$K$, соответственно; 4, 5, 6 — $\tau_{\Sigma}^{ок}$ ЖМО радиусом 6, 8, 10 мм и коэффициентом теплоотдачи 1, 4 и 10 кВт/(м² · К)

Из полученных данных следует, что продолжительность плавления окатыша снижается ( $\tau_{\Sigma}^{ок} \to \min$ ) при увеличении $\alpha_{эф}$ и уменьшении $r_{ок}$ , причём при подаче ЖМО под электрические дуги (кривые 4, 5 и 6) общее время $\tau_{\Sigma}^{ок}$ в 2–3 раза ниже (кривые 1, 2 и 3), чем при условии подачи окатышей вне зоны непосредственного влияния дуг.

В лабораторных условиях для оценки влияния степени обезуглероживания ванны на скорость плавления ЖМО, металлизованные окатыши расплавляли в тигле с жидким металлом, при этом перемешивание осуществляли продувкой азотом. Оценивали зависимость скорости плавления ЖМО ($V_{пл}$ , кг /с) от степени перемешивания расплава ($V_{N_2}$ , м$^3$/с) и содержания углерода в окатышах. Из полученных данных (рис. 2) можно сделать вывод о заметном влиянии на скорость плавления окатышей в металло-шлаковой ванне содержания в них углерода и интенсивности продувки расплава газообразным азотом, что можно соотнести со скоростью обезуглероживания ванны.

В производственных условиях при подаче потока ЖМО через полые электроды в подэлектродное пространство совместно с сыпучими добавочными материалами (известь, коксик) наблюдается повышение вспениваемости шлака, что позволяет повысить эффективность работы ДСП. При этом снижение расхода электроэнергии составило 8,878 ГДж или 16,4 кВт ч/т стали, что согласуется с данными [10]. При подаче кислорода через сопла ТКГ на шлак и металл часть $O_2$ расходуется на дожигание $CO$ , а остальная часть — на окисление углерода в металле, т.е. $V_c = K_1 \cdot q_0 = f(\Delta[O])$ , где $K_1$ — стехиометрический коэффициент; $q_0$ — скорость поступления $O_2$ в расплав, $c^{-1}$ . При этом окисленность металла $\Delta[O] = [O]_ф - [O]_p$ , где $[O]_ф$ и $[O]_p$ — фактическое и равновесное содержание $O_2$ в объёме металла соответственно. Равновесное с углеродом содержание кислорода в металле равно $[O]_p = p_{co} / (K_C \cdot [C] \cdot f_C \cdot f_0)$ , где $p_{co}$ — давление выделения пузырей $CO$ , Н/м$^2$; $K_C$ — константа равновесия реакции окисления углерода; $[C]$ — содержание углерода в расплаве, % ; $f_C$ и $f_0$ — коэффициент активности углерода и кислорода.

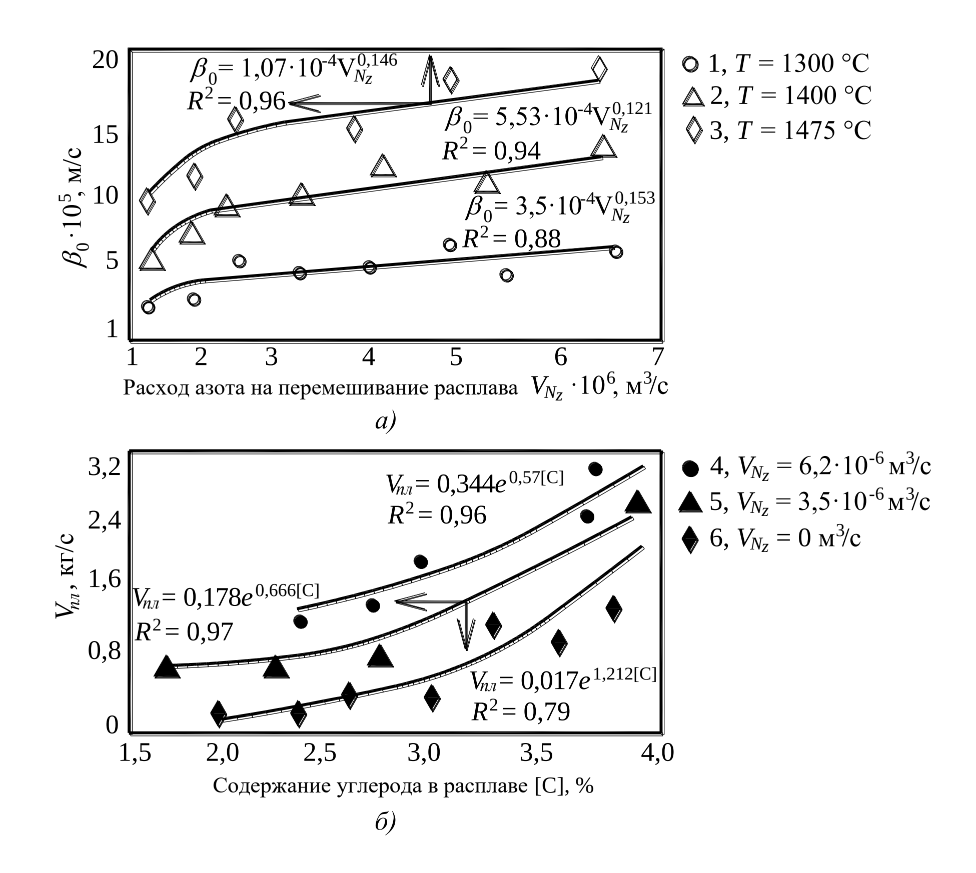



Рис. 2. Зависимость коэффициента массоотдачи от расхода азота при различных температурах его нагрева (*а*) и влияние содержания углерода в расплаве на скорость плавления окатышей при различных расходах азота (*б*)

Из анализа приведённых выражений следует, что чем выше содержание $[C]$, тем меньше значение $[O]_p$, а следовательно выше перепад $\Delta[O]$, что приводит к повышению скорости обезуглероживания металла, т.е. $V_c \rightarrow \max$. Это обстоятельство показывает, что вспенивание шлака и погружение электрических дуг в шлак интенсифицирует процессы нагрева и плавления окатышей в ванне дуговой печи [5, 7–9, 10].

Эффективность энергосберегающих условий электроплавки ЖМО в ДСП определяется взаимосвязью уровня теплопитания ванны ( $\Delta q_в$, $Bm$ ) и фактическим расходом окатышей ( $V_{ок}$, кг/с в соответствии с выражением:

$$\Delta q_в = G_\tau \cdot \overline{C_m}(\frac{dT}{d\tau}) = (G_0 + V_{ок}\cdot\tau)\cdot\overline{C_m}\cdot V_t \quad (4)$$

где $G_\tau = G_0 + V_{ок}\cdot\tau$ — текущая масса металла в печи по ходу загрузки ЖМО в ванну, кг; $G_0$ — начальная масса в печи от расплавления скрапа, кг; $\overline{C_m}$ — средняя теплоёмкость металла в печи, Дж/(кг·°С); $\tau$ — время загрузки ЖМО в печь, с; $V_t$ — скорость нагрева металла в ДСП, °С/с.

После преобразования выражения (4) формула расчёта расхода окатышей по ходу электроплавки имеет вид:

$$V_{ок} = (\frac{\Delta q_в}{\overline{C_m} + V_t} - G_0)/\tau. \quad (5)$$

Эффективность электроплавки ЖМО в ДСП определяется необходимостью соблюдения оптимального соотношения между показателями расхода окатышей ( $V_{ок}$, кг / с) и скоростью их плавления ( $V_{пл}$, кг /с) в ванне агрегата, т.е. $V_{ок} \le V_{пл} = m_{ок}\cdot n/\tau$, где $m_{ок}$ — масса окатышей, кг; $n$ — количество одновременно плавящихся окатышей на поверхности металла под дугами; $\tau$ — время плавления окатыша, с. При попадании порций ЖМО в расплав на поверхность испарения металла (менисков под дугами) значение $n = 0{,}9069\cdot(3\cdot S_{мен})/S_{ок}$, где $0{,}9069$ — коэффициент размещения окатышей в слое при их наилучшем заполнении поверхности менисков ( $3\cdot S_{мен}$, $м^2$ ); $S_{мен} = 2\pi(L_д + r_э)\cdot h$,

где $L_д$ — длина дуги, м; $r_э$ — радиус электрода в печи, м; $S_{ок} = \pi \cdot r_{ок}^2$ — поверхность, которую занимает один окатыш, м²; $r_{ок}$ — средний радиус окатышей, м.

С учётом вышеизложенного оптимальное соотношение для электроплавки окатышей в печи имеет вид: $V_{ок} / V_{пл} = K_{0(х.э.)}$, где $K_{0(х.э.)}$ — критерий оптимального хода плавки стали в ванне ДСП. С учётом преобразований и при $m_{ок} = \frac{4}{3}\pi \cdot r_{ок}^3 \cdot \rho_{ок}$ значение $K_{0(х.э.)}$ имеет вид:

$$K_{0(х.э.)} = \left(\frac{\Delta q_в}{C_m \cdot V_t} - G_0\right) / \left(\frac{4}{3}\pi \cdot r_{ок}^3 \cdot n\right). \quad (6)$$

Из анализа выражения (6) следует, что если критерий оптимальности больше единицы, то снижается скорость плавления ($V_{пл} \to \min$), а если $K_{0(х.э.)} < 1$, то скорость загрузки окатышей повышается ($V_{ок} \to \max$), но при этом падает значение $V_{пл}$ по ходу процесса плавки. По ходу электроплавки ЖМО теплоусвоение ванны $\Delta q_в = Q_в \cdot \tau / G_\tau$, а загрузку окатышей в дуговую печь осуществляют в зависимости от теплового состояния ванны ($Q_в$,Вт · ч/т) с учётом погружения тепла от электрических дуг ($Q_\Sigma^д$,Вт · ч/т) и дожигания ($Q_{CO}$, Вт · ч/т) оксида углерода ($CO$) струями кислорода ТКГ во вспененном шлаке агрегата, то есть

$$Q_в = (Q_\Sigma^д + Q_{дож}^{CO}) - (Q_{изл}^ф + Q_{изл}^{шл}), \quad (7)$$

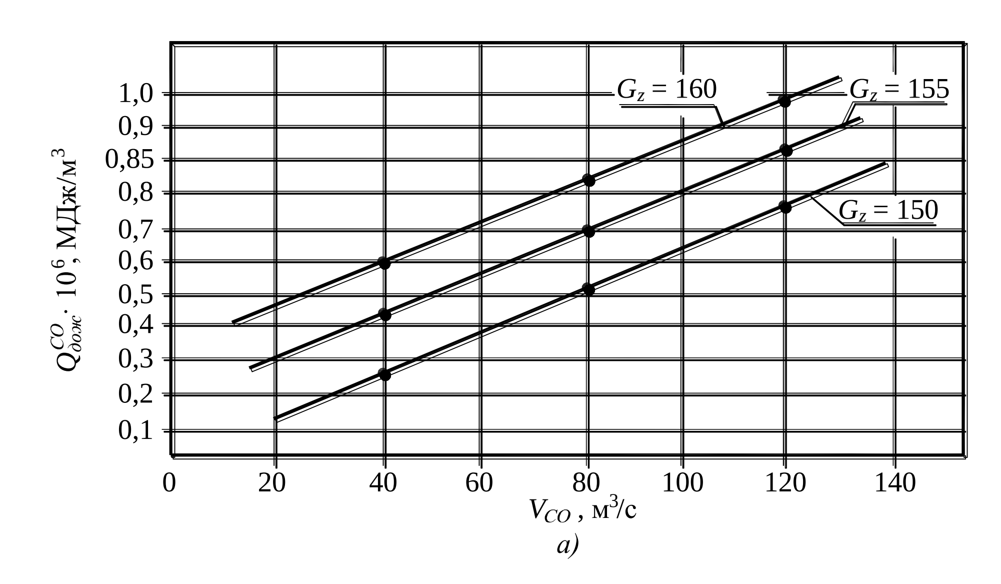
где $Q_\Sigma^д$ — тепловая мощность всех электрических дуг в печи, $Вт \cdot ч / т$; $Q_{изл}^ф$ и $Q_{изл}^{шл}$ — потери тепла через футеровку и шлаком, Вт·ч/т.

Струи кислорода из сопел ТКГ по ходу движения до поверхности шлака и в объёме шлака взаимодействуют с потоком $CO$, выделяющегося из ванны, с последующим его дожиганием по реакции $CO + 0,5 \cdot O_2 \to CO_2$ с выделением тепла около $12,5$ МДж/м³. Объём выделяющегося $CO$ из ванны печи определяется по формуле:

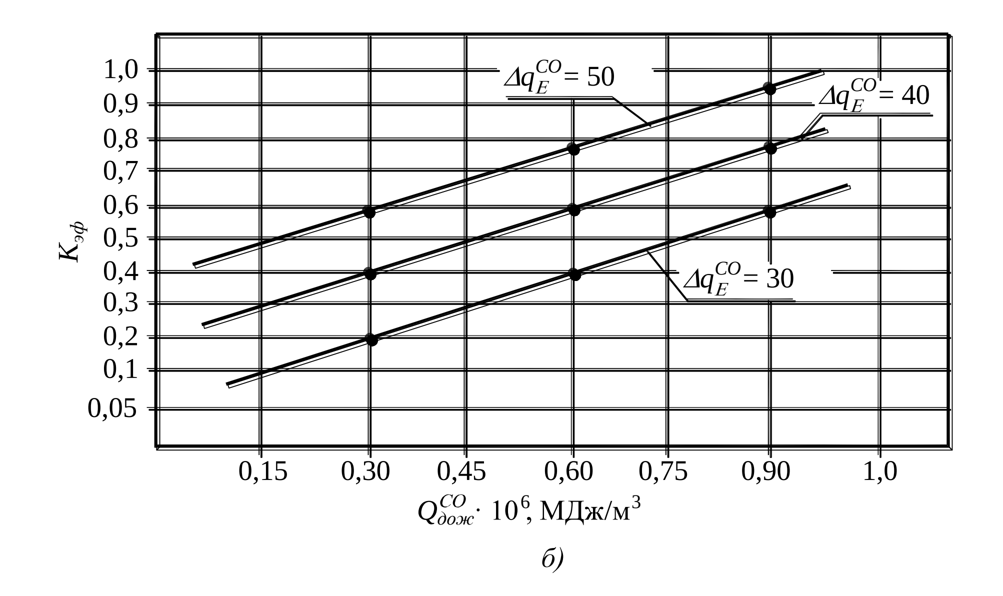
$$V_{CO} = 28/12(V_c \cdot G_\tau + V_{ок} \cdot [C]) / (G_0 \cdot 100 \cdot \rho_{co}), \quad (8)$$

где $V_c$ — скорость обезуглероживания металла в ванне ДСП, $\%[C]/c$; $\rho_{co}$ — плотность газа пузырей, кг/м³ . Значение $Q_{дож}^{CO} = V_{co} \cdot Q_{co} \cdot \tau / G_\tau$, где $Q_{co}$ — тепловой эффект реакции дожигания 1 $м^3$ $CO$ до $CO_2$, равный $\approx 12500$ $кДж / м^3$.

Эффективность режима дожигания $CO$ струями ТКГ во вспененном шлаке оценивается двумя параметрами: КПД дожигания $CO$, равным $\eta_{CO} = CO_2 / (CO_2 + CO)$ и эффективностью теплопередачи $K_{эф} = \Delta q_E^{CO} / Q_{дож}^{CO}$, где $\Delta q_E^{CO}$ — доля энергии дожигания $CO$, переданная шлаковой ванне.



*а)*




*б)*

Рис. 3. Зависимость количества выделяемой энергии (*а*) при дожигании *CO* ( $Q_{дож}^{CO}$ , МДж/м³) от скорости его выделения из ванны ( $V_{CO}$ , м³/с) при различных значениях массы металла в печи по ходу загрузки ЖМО в расплав ( $G_\tau$ , кг); влияние $Q_{дож}^{CO}$ (*б*) на коэффициент эффективности теплопередачи от газов к шлаку ( $K_{эф}$ ) при различных долях энергии дожигания *CO*, передаваемой шлаковой ванне ( $\Delta q_E^{CO}$ , % ) в ДСП

Из полученных данных следует, что с увеличением объёма выделяемого из ванны *CO* ($V_{CO} \to \max$ ), количество образуемой энергии ( $Q_{дож}^{CO}$ ,МДж/м³) в печи возрастает по мере увеличения массы металла ( $G_\tau \to \max$ ) в ванне. При этом по мере возрастания величины теплоты дожигания $Q_{дож}^{CO}$ коэффициент эффективности теплопередачи ( $K_{эф}$ ) от потока дожигаемого газа к ванне в печи возрастает при создании условий увеличения $\Delta q_E^{CO}$ . Установлено, что эти условия выполняются при, например, вращении топливно-кислородного факела от ТКГ, повышении скорости его истечения из горелки или увеличении угла её наклона к поверхности ванны.

При организации дожигания $CO$ струями $O_2$ от ТКГ в условиях заглубления факелов дожигания во вспененный шлак механизм теплопередачи соответствует условиям при погружном горении, которое отличается высокой эффективностью теплообмена ( $K_{эф} \to 1$). Шлаковая ванна нагревается со скоростью 5–10 $°C/мин$ и за счёт интенсивной её циркуляции от обезуглероживания и плавления ЖМО тепло передаётся металлу. Теплообмен между шлаком и ванной металла ускоряется за счёт $V_C \to \max$ и выбрасывания капель металла в шлак с последующим их оседанием в металл с более высокой температурой. Поскольку скорость поступления в шлак тепла от дожигания $CO$ составляет $Q_ш = V_t \cdot G_ш \cdot \overline{c_ш}$ , где $V_t$ — скорость нагрева шлака; $G_ш$ и $\overline{c_ш}$ — масса шлака и его удельная теплоёмкость соответственно. При массовой скорости поступления капель (брызг) металла в шлак $V_k$ их массовая доля в шлаке будет $K$ , тогда масса металлических капель в шлаке составит $G_k = G_ш \cdot K$ . При этом продолжительность пребывания капель металла в шлаке будет $\tau_к = G_k / V_k$ , а уровень нагрева их за это время равно $\Delta t_k = V_k \cdot \tau_k$ , °С Перенос тепла при оседании капель в ванну металла составит $Q_k = V_k \cdot \tau_k \cdot \overline{c_m}$ , где $\overline{c_m}$ — удельная теплоёмкость капель металла, Дж/(кг · °С).

На основе совместного рассмотрения равенств для $Q_ш$ и $Q_k$ получим соотношение:

$$Q_ш / Q_k = (C_k \cdot K) / (\overline{c_m} \cdot K + (1-K) \cdot \overline{c_m}) . \quad (9)$$

Экспериментально установлено, что с увеличением расхода $O_2$, идущего на дожигание $CO$ значения $Q_{CO}^{дож}$ , $Q_k$ и $V_C$ возрастают, что интенсифицирует теплопередачу в системе «шлак — металл» за счёт стремления $K_{эф}$ и $\Delta q_\Sigma^{CO} \to \max$ . При этом коэффициент полезного теплоиспользования в дуговой печи равен:

$$\eta_{КПТ} = 1 - [(Q_{ух}^{г} + q_{пот} \cdot \tau_{пл}) / (Q_{экз}^{р} + Q_{CO}^{дож} + Q_к)] , \quad (10)$$

где $Q_{ух}^{г}$ — потери тепла с уходящими газами и пылью; $q_{пот}$ — удельные потери тепла через футеровку агрегата; $Q_{экз}^{р}$ — тепловой эффект реакции окисления углерода и других составляющих химсостава ЖМО.

Анализ выражений (5), (7)–(10) показывает, что при использовании режима дожигания $CO$ в шлаке струями $O_2$ от ТКГ параметры $V_t$, $Q_{CO}^{дож}$, $Q_k$ и $\eta_{КПТ}$ существенно возрастают, что в целом интенсифицирует теплообмен между шлаком и металлом, а это способствует улучшению показателей процесса $\Delta q_{\Sigma}^{CO}$, $K_{эф}$ и $\tau_{пл}$, что приводит к повышению производительности печи и снижению удельного расхода электроэнергии на процессы плавки ЖМО в агрегате.

Расходы кислорода от ТКГ на сжигание топлива и дожигание $CO$ не только интенсифицируют нагрев шлака в печи, но и влияют на окисленность шлака ($\sum FeO$, %), режимы обезуглероживания и нагрева металла в ДСП при различных расходах окатышей в агрегате.

**Выводы**. Теплоэнергетические условия электроплавки ЖМО в ДСП при подаче их через трубчатые (полые) электроды с применением ТКГ и дожиганием $CO$ в шлаке являются более выгодными по сравнению с типовым режимом плавления окатышей, когда используются сплошные графитизированные электроды, т.е. при непрерывной подаче металлизованных окатышей в печь вне зоны воздействия на окатыш электрических дуг, так как температура шлакового расплава в этой зоне существенно ниже, чем в расплаве под дугами. При использовании топливно-кислородных горелок в дуговой печи необходим избыток $O_2$ на дожигание $CO$ в шлаке и вне его, что интенсифицирует нагрев и плавление окатышей в системе «шлак — металл», а это обстоятельство, в свою очередь, способствует улучшению технико-экономических показателей процесса электроплавки стали.

**Библиографический список**

1. Henrion, R. Perfect electric melting / R. Henrion, F. Schleimer // Iron and Steelmaker. — 1982. — V.9. — № 11. — P. 48–51.

2. Kohiani, T. Features and trend in electric steelmaking for new market mills / T. Kohiani, K.Kudo, S. Murokami // Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan. — 1981. — № 10. — P. 431–436.

3. Способ электроплавки стали: патент 236009 Рос. Федерация / Э. Э. Меркер, А. А. Гришин, А. И. Кочетов. — опубл. 27.06.2009, Бюл. № 18. — 27 с.

4. Сазонов, А. В. Интенсификация плавления окатышей при их загрузке в зону воздействия электрической дуги на шлаковый расплав / А. В. Сазонов, Э. Э. Меркер, Е. А. Черменёв // Бюллетень «Чёрная металлургия». — 2011. — № 8. — С. 62–64.

5. Черменёв, Е. А. Об эффективности электроплавки стали при загрузке металлизованного сырья через трубчатые электроды в ванну дуговой печи / Е. А. Черменёв, Э. Э. Меркер, О. П. Коберник // Бюллетень «Чёрная металлургия». — 2013. — № 5. — С. 48–51.

6. Меркер, Э. Э. Особенности технологии электроплавки окатышей в дуговой печи / Э. Э. Меркер, А. В. Сазонов, А. А. Гришин // Известия ВУЗов. Чёрная металлургия. — 2008. — № 2. — С. 31–33.

7. Меркер, Э. Э. Энергосберегающий режим плавки окатышей в 150-т ДСП / Э. Э. Меркер, В. В. Федина, А. И. Кочетов // Электрометаллургия. — 2003. — № 9. — С. 43–44.

8. Меркер, Э. Э. Электроплавка окатышей в дуговой печи / Э. Э. Меркер, В. В. Федина, Д. А. Харламов // Бюллетень «Чёрная металлургия». — 2004. — № 7. — С. 16–19.

9. Меркер, Э. Э. Повышение энергоэффективности электроплавки стали при подаче окатышей в ДСП через каналы в электродах / Э. Э. Меркер, В. А. Степанов // Бюллетень «Чёрная металлургия». — 2014. — № 1. — С. 41–47.

10. Меркер, Э. Э. Энергосберегающие условия плавления металлизованных окатышей при их подаче через трубчатые электроды в ванну дуговой печи / Э. Э. Меркер, Е. А. Черменёв // Сталь. — 2015. — № 1. — С. 23–28.

**References**

1. Henrion, R., Schleimer, F. Perfect electric melting. Iron and Steelmaker, 1982, vol. 9, no. 11, pp. 48–51.

2. Kohiani, T., Kudo, K., Murokami, S. Features and trend in electric steelmaking for new market mills. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 1981, no. 10, pp. 431–436.

3. Merker, E.E., Grishin, A.A., Kochetov, A.I. Sposob elektroplavki stali: patent 236009 Ros. Federatsiya. [Steel electrosmelting method.] Patent RF no. 236009, 2009 (in Russian).

4. Sazonov, A.V., Merker, E.E., Chermenev, E.A. Intensifikatsiya plavleniya okatyshey pri ikh zagruzke v zonu vozdeystviya elektricheskoy dugi na shlakovyy rasplav. [Intensification of pellets melting under charging them in the impact zone of the electric arc on the melted slag.] Bulletin “Ferrous Metallurgy”, 2011, no. 8, pp. 62–64 (in Russian).

5. Chermenev, E.A., Merker, E.E., Kobernik, O.P. Ob effektivnosti elektroplavki stali pri zagruzke metallizovannogo syr'ya cherez trubchatye elektrody v vannu dugovoy pechi. [On efficiency of steel electrosmelting when charging metallized raw materials through the tube wires to the arc furnace bath.] Bulletin “Ferrous Metallurgy”, 2013, no. 5, pp. 48–51 (in Russian).

6. Merker, E.E., Sazonov, A.V., Grishin, A.A. Osobennosti tekhnologii elektroplavki okatyshey v dugovoy pechi. [Features of pellet electrosmelting technology in arc furnace.] Izvestia. Ferrous Metallurgy, 2008, no. 2, pp. 31–33 (in Russian).

7. Merker, E.E., Fedina, V.V., Kochetov, A.I. Energosberegayushchiy rezhim plavki okatyshey v 150-t DSP. [Energy-saving mode of pellet melting in 150-t ASF.] Elektrometallurgiya, 2003, no. 9, pp. 43–44 (in Russian).

8. Merker, E.E., Fedina, V.V., Kharlamov, D.A. Elektroplavka okatyshey v dugovoy pechi. [Pellet melting in arc furnace.] Bulletin “Ferrous Metallurgy”, 2004, no. 7, pp. 16–19 (in Russian).

9. Merker, E.E. Stepanov, V.A. Povyshenie energoeffektivnosti elektroplavki stali pri podache okatyshey v DSP cherez kanaly v elektrodakh. [Improvement in energy efficiency of steel electrosmelting while supplying pellets to ASF through the electrode ducts.] Bulletin “Ferrous Metallurgy”, 2014, no. 1, pp. 41–47 (in Russian).

10. Merker, E.E., Chermenev, E.A. Energosberegayushchie usloviya plavleniya metallizovannykh okatyshey pri ikh podache cherez trubchatye elektrody v vannu dugovoy pechi. [Energy-saving metallized pellet melting conditions when supplying them through the electrode ducts to the arc furnace bath.] Stal', 2015, no. 1, pp. 23–28 (in Russian).

Поступила в редакцию 15.02.2016
Сдана в редакцию 16.02.2016
Запланирована в номер 23.03.2016